

Виявлення особливостей топографії паперу з водяними знаками на мікро- та нанорівнях

Т. Ю. Киричок, Т. Є. Клименко, Н. Л. Талімонова, К. В. Свеженцова

Досліджено поверхневу структуру захищеного від підробки паперу із позитивними і негативними водяними знаками при різних масштабах оцінювання – від мікрометрів до рівня нанометрів, на основі методів контактної профілометрії та атомно-силової мікроскопії. Було виявлено, що структурні параметри поверхні захищеного паперу є неоднаковими для ділянок із водяними знаками та без.

Результати вимірювання контактним профілометром дали змогу прослідкувати кореляцію між значеннями середнього арифметичного відхилення профілю та наявністю водяних знаків. Значення найбільшої висоти профілю не залежить від ділянки вимірювання, що може бути пов'язано із хаотичним розміщенням волокон та частинок наповнювача у паперовій масі, що виступають над лінією профілю.

Аналіз значень середнього арифметичного відхилення профілю, отриманого методом атомно-силової мікроскопії показав, що для ділянок із негативними водяними знаками воно є більшим, ніж для ділянок із позитивними водяними знаками. Залежність найбільшої висоти профілю від ділянки вимірювання не прослідковується чітко. Це може бути пов'язано з тим, що розмір розглянутої ділянки (3000х3000 нм) охоплює лише частину волокна целюлози.

Результати проведеного аналізу показали придатність обох методів для оцінки специфічних характеристик поверхні паперу, що визначає характер взаємодії даного виду паперу із друкарськими фарбами в процесі друку. Метод профілометрії дає змогу визначити параметри профілю поверхні паперу, сформованого певним чином, а метод атомно-силової мікроскопії дозволяє аналізувати морфологію його компонентів, що розміщені на поверхні (волокна, частинки наповнювача, тощо). Інформація про структурні властивості паперу дає змогу прогнозувати якість поліграфічного відтворення, зокрема чіткість відтворення тонких гільйошних ліній на водяних знаках, що є актуальним, оскільки попереджає відбракування поліграфічної продукції спеціального призначення

Ключові слова: захищений папір, шорсткість, контактна профілометрія, атомно-силова мікроскопія, поверхнева структура паперу

1. Вступ

Одним із вирішальних факторів забезпечення якості при високоякісному друці захищеної поліграфічної продукції є те, як проявляються фізичні і технічні властивості паперу і фарби.

Папір являє собою складну структуру, що складається із переплетених волокон, частинок наповнювача та допоміжних добавок. Структурні властивості

паперу безпосередньо впливають на якість поліграфічного відтворення визначаючи значним чином взаємодію із фарбою.

Переважає більшість видів паперу, призначеного для друку документів суворої звітності та цінних паперів, містить водяні знаки (ВЗ), що формуються на паперовому полотні в процесі його виробництва. Наявність водяних знаків спричиняє неоднорідність поверхневих та об'ємних характеристик паперу, що може вплинути на оптичну густину та колірність відбитка, чіткість відтворення тонких гільйошних ліній.

Зважаючи на неоднорідність паперового полотна, актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на виявлення структурних відмінностей його суміжних ділянок, що дозволить прогнозувати якість поліграфічного відтворення.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження структурних характеристик паперу різними методами, а також вплив цих характеристик на якість друку вже тривалий час перебувають у фокусі уваги як фахівців стандартизації [1, 2], так і науковців [3].

ВЗ є одним із найбільш уживаних захисних елементів цінних паперів, в тому числі банкнот [4–6], тому роботи, спрямовані на дослідження загальних тенденцій розвитку паперу з ВЗ [4, 5], зносостійкості паперу [7, 8], електрофізичних властивостей паперу [9, 10] та якості поліграфічного відтворення на ньому [5, 11], виконуються багатьма науковцями.

У роботах [12, 13] досліджено глибину проникнення офсетної фарби у товщу паперу із ВЗ та його поверхневу структуру, однак дослідження поверхні проводилися лише на макрорівні, оскільки є результатами даних механічного профілометра.

Дослідження [13] були розвинені в роботі [14], де були використані фактичні результати і встановлено фрактальну геометрію структури паперу з ВЗ. Оскільки в роботі використані результати лише на мікрорівні, опис поверхні потребує більш детального дослідження з вищою роздільною здатністю.

У роботі [15] наведено результати досліджень поверхні паперу різними методами (оптичний мікроскоп, лазерний профілометр, скануючий електронний мікроскоп, АСМ). Зроблено висновок, що всі застосовані методи є доцільними і дозволяють більш детально аналізувати поверхню паперу, однак дослідження не стосувалося паперу із ВЗ, який має певні особливості.

Результати дослідження поверхні крейдованого, некрейдованого та ламінованого паперу методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) описано в роботі [16]. Виявлено, що цей метод придатний для контролю якості однорідної за своєю природою поверхні паперу. Однак папір з ВЗ, що використовується для друку цінних паперів, хоч і має однаковий склад ділянок з ВЗ та поза ними, але ВЗ формуються за рахунок різної щільності волокнистої композиції утворюючи суттєві неоднорідності. Тому питання щодо можливості дослідження методом АСМ поверхневої структури захищеного паперу з ВЗ залишається невирішене.

У роботі [17] параметри шорсткості поверхні паперу визначалися методом Паркера та за допомогою АСМ. Результати наведених методів мали кореляцію, що дало підстави стверджувати про можливість застосування АСМ для опера-

тивного контролю процесів поверхневої обробки паперу. Але варто зазначити, що метод Паркера полягає у вимірюванні швидкості протікання повітря між поверхнею паперу та аналізатором [2], тому при використанні на ділянках паперу із ВЗ та поза ними отримані результати будуть усереднені, отже доцільність використання методу АСМ для паперів із макронерівностями систематичного порядку залишається невирішеною.

В роботі [18, 19] було проаналізовано вплив морфології поверхні кількох видів паперу на однорідність задруковування цифровим способом друку. Було використано крейдований та некрейдований папір, характеристики поверхні яких досліджували методом АСМ. Дослідження дали можливість провести кореляцію між даними АСМ та однорідністю задруковування, але не досліджено папір із ВЗ, для якого однорідність задруковування на суміжних ділянках є актуальним питанням.

В роботі [20] методом АСМ було досліджено топографію поверхні паперу (без поверхневого покриття, з каоліновим та карбонат кальцієвим покриттям), а також проникнення та розподіл пігментів УФ-фарби за допомогою конфокального лазерного скануючого мікроскопу. Результати АСМ показали, що поверхня паперу, покритого шаром каоліну, є найбільш рівною; розмір пор поверхні шару із карбонату кальцію є меншим, ніж каолінового; розміри та глибина пор паперу без покриття є найбільшими серед зразків. Однак дана робота не стосується захищених видів паперу із ВЗ, для яких глибина проникнення фарби безпосередньо впливає на якість кольоровідтворення.

Отже, дослідження поверхні паперу з ВЗ із застосуванням методів, котрі дозволять вивчати топографію на нанорівнях є актуальними. Перспективним методом для таких досліджень є АСМ.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є виявлення особливостей структури паперу з ВЗ за допомогою методів з великою роздільною здатністю, зокрема АСМ, на різних ділянках, з лицьового та сіткового боку, що дасть змогу більш точно описати топографічну структуру поверхні паперу з ВЗ, та використовувати це для прогнозування якості друку.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- визначити структурні параметри поверхні паперу із водяними знаками за допомогою методів контактної профілометрії та атомно-силової мікроскопії;
- провести кореляцію результатів, отриманих різними методами.

4. Матеріали та методи дослідження структурних параметрів поверхні паперу з водними знаками

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались

Для проведення експериментальних досліджень було використано захищений папір без покриття та оптичних відбілювачів з позитивними та негативними ВЗ (рис. 1). Окремі технічні характеристики отримані авторами під час попередніх досліджень [13] наведено в табл. 1.

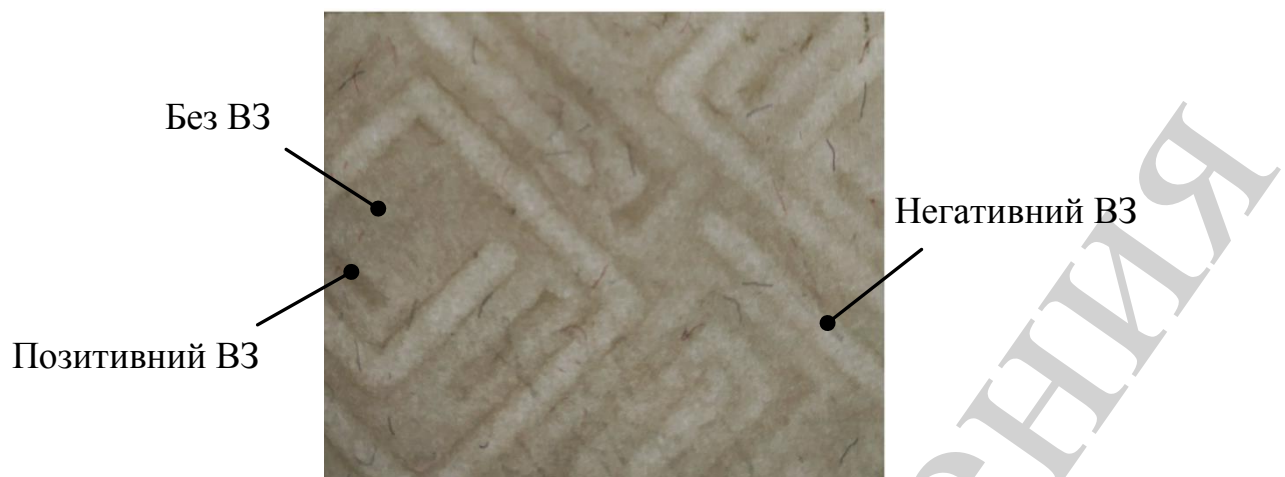


Рис. 1. Фотографія зразка захищеного паперу на просвіт

Таблиця 1

Технічні характеристики незадрукованого паперу [13]

| № п/п | Параметри | | Значення |
|-------|-------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | Маса, г/ м ² | | 90 |
| 2 | Координати кольору (L, a, b*) | | 92,58; –0,31; 5,31 |
| 3 | Оптична густина на просвіт | Ділянка без ВЗ | 0,57 |
| | | Ділянка з негативним ВЗ | 0,50 |
| | | Ділянка з позитивним ВЗ | 0,64 |
| 4 | Товщина, мкм | Ділянка без ВЗ | 0,079 |
| | | Ділянка з негативним ВЗ | 0,074 |
| | | Ділянка з позитивним ВЗ | 0,088 |

Структурні параметри поверхні паперу із ВЗ визначалися за допомогою методів контактної профілометрії та АСМ.

Вимірювання шорсткості зразків здійснювалося за допомогою профілометра MarSurf PS1. Було застосовано щуп з радіусом голки 2 мкм, вимірювальне зусилля – 0,7 мН, довжина трасування становила 4 мм. Морфологія поверхонь зразків досліджувалася методом АСМ на скануючому зондовому мікроскопі FemtoScan Online із застосуванням програмного забезпечення FemtoScan Online.

4. 2. Методика визначення показників властивостей зразків

Для оцінювання профілю нерівностей поверхні застосовано метод профілометрії, що ґрунтується на контактному аналізі ділянки поверхні паперу тонкою голкою і дає змогу отримати розмірні параметри нерівностей та збільшене зображення профілю поверхні [21]. Вимірювання шорсткості здійснювалось із сіткового та лицьового боків аркуша на ділянках з водяним знаком та поза його межами.

Для дослідження морфології поверхні зразків методом АСМ здійснювалося сканування у контактному режимі на повітрі з використанням кантилеверів frN10S . Згідно з паспортними даними типові радіуси кривизни кантилеверів менше 10 нм. Сканування проводилося на таких ділянках паперу: ділянка з позитивним та негативним водяним знаком, ділянка без водяного знаку. Аналіз проводився з лицьового та з сіткового боку паперового аркуша.

Дослідження проводилися при температурі в межах 20–24 °С та відносній вологості повітря близько 50–56 %.

5. Результати досліджень структури паперу з водяними знаками

Результати вимірювань параметрів шорсткості поверхні паперу, що отримані методом контактної профілометрії, наведено в табл. 2. Було визначено R_a – середнє арифметичне відхилення профілю (середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини); R_z – висота нерівностей профілю по 10 точках (сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини); R_{\max} – найбільша висота профілю (відстань між лінією виступів профілю і лінією впадин профілю в межах базової довжини).

На рис. 2, 3 наведено профілограми, що унаочнюють результати вимірювання профілометром на різних ділянках паперу з позитивним ВЗ, з негативним ВЗ та поза його межами. Обробка сигналів профілометра дозволила отримати усереднений параметр шорсткості поверхні на кожній з досліджуваних ділянок паперу. Усереднений показник кількісно характеризує нерівності поверхні в розрахунку на довжину трасування 4 мм. Наведені профілограми побудовані за методикою, що висвітлено в [13].

Таблиця 2

Параметри шорсткості поверхні зразків паперу, отримані методом контактної профілометрії, мкм

| Параметри шорсткості | Сітковий бік | | | Лицьовий бік | | |
|----------------------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | Нег.ВЗ | Без ВЗ | Поз.ВЗ | Нег.ВЗ | Без ВЗ | Поз.ВЗ |
| R_z | 17,450 | 17,380 | 16,760 | 17,890 | 16,820 | 17,010 |
| R_a | 3,186 | 3,163 | 3,008 | 3,166 | 3,0160 | 2,949 |
| R_{\max} | 20,380 | 21,440 | 19,880 | 22,080 | 20,010 | 21,220 |
| Абс. похибка 95 % | 0,119 | 0,143 | 0,111 | 0,125 | 0,197 | 0,155 |
| Відн. похибка, % | 3,741 | 4,512 | 3,674 | 3,952 | 6,528 | 5,243 |

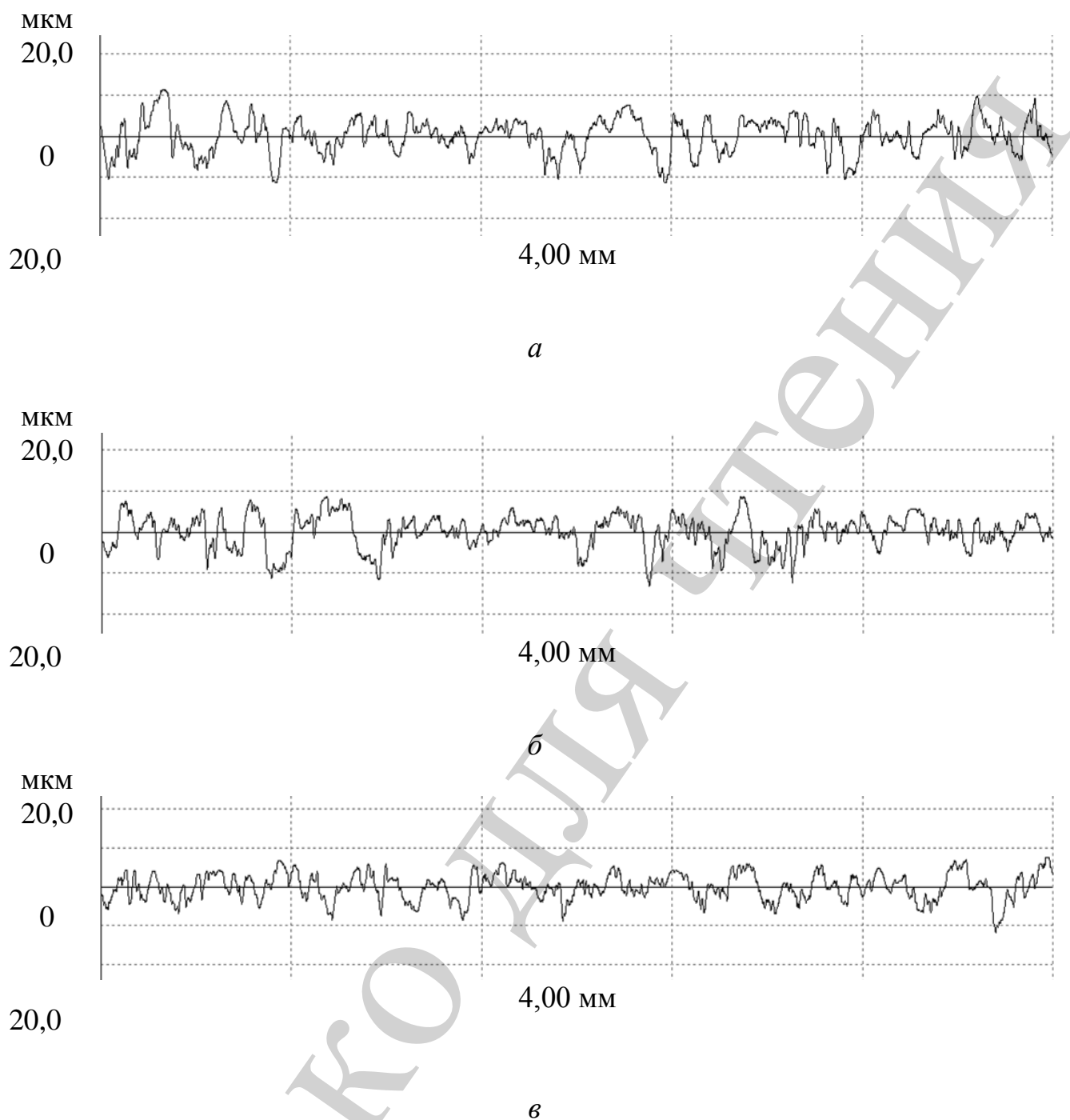


Рис. 2. Профілограми поверхні сіткового боку зразків паперу: *а* – ділянка з негативним водяним знаком; *б* – ділянка без водяного знаку; *в* – ділянка з позитивним водяним знаком

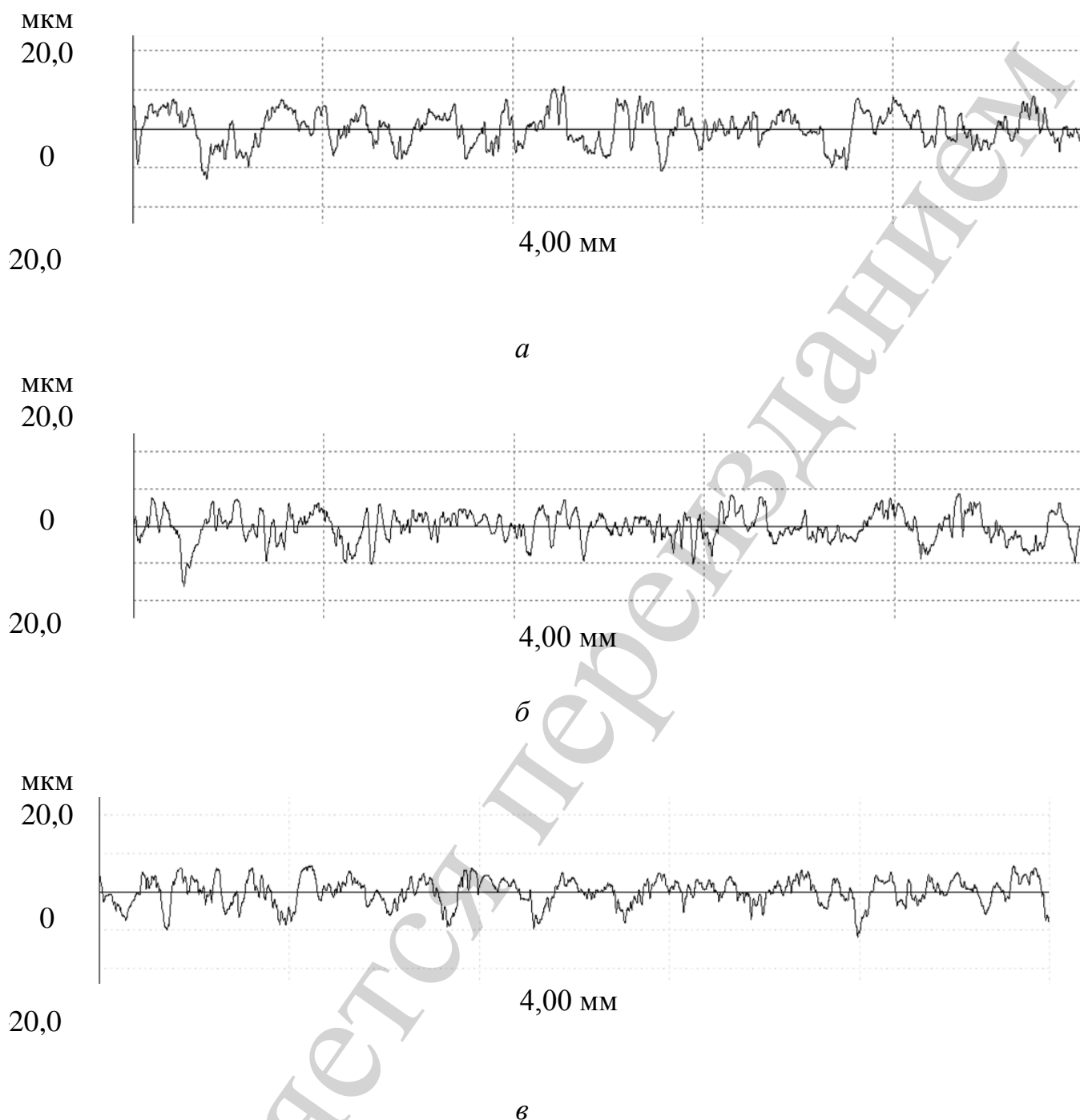


Рис. 3. Профілограми поверхні лицьового боку зразків паперу: *а* – ділянка з негативним водяним знаком; *б* – ділянка без водяного знаку; *в* – ділянка з позитивним водяним знаком

На основі отриманих даних побудовано графіки залежності параметрів шорсткості R_a та R_{max} від наявності ВЗ на різних ділянках паперу з лицьового та сіткового боку (рис. 4). Аналізуючи значення R_a , можна дійти висновку, що для сіткового боку цей показник є більшим (для ділянок із негативними ВЗ – 3,186 мкм, для ділянок із позитивними ВЗ – 3,008 мкм), ніж для лицьового (для ділянок із негативними ВЗ – 3,166 мкм, для ділянок із позитивними ВЗ – 2,949 мкм). На ділянках негативних ВЗ середнє арифметичне відхилення профілю є найбі-

льшим, а найменшим – на позитивних ВЗ, що пояснюється більшим ущільненням волокон на цих ділянках та більшим тиском каландрів.

Значення найбільшої висоти профілю не залежить від ділянки вимірювання, що може бути пов'язано із хаотичним розміщенням волокон та частинок наповнювача у паперовій масі, що виступають над лінією профілю. При порівнянні ділянок негативних і позитивних ВЗ, видно, що значення R_{\max} більше на негативних (сітковий бік – 20,380 мкм, лицьовий бік – 20,080 мкм).

Математичне очікування стосовно R_a та R_{\max} наведено на рис. 4, 5.

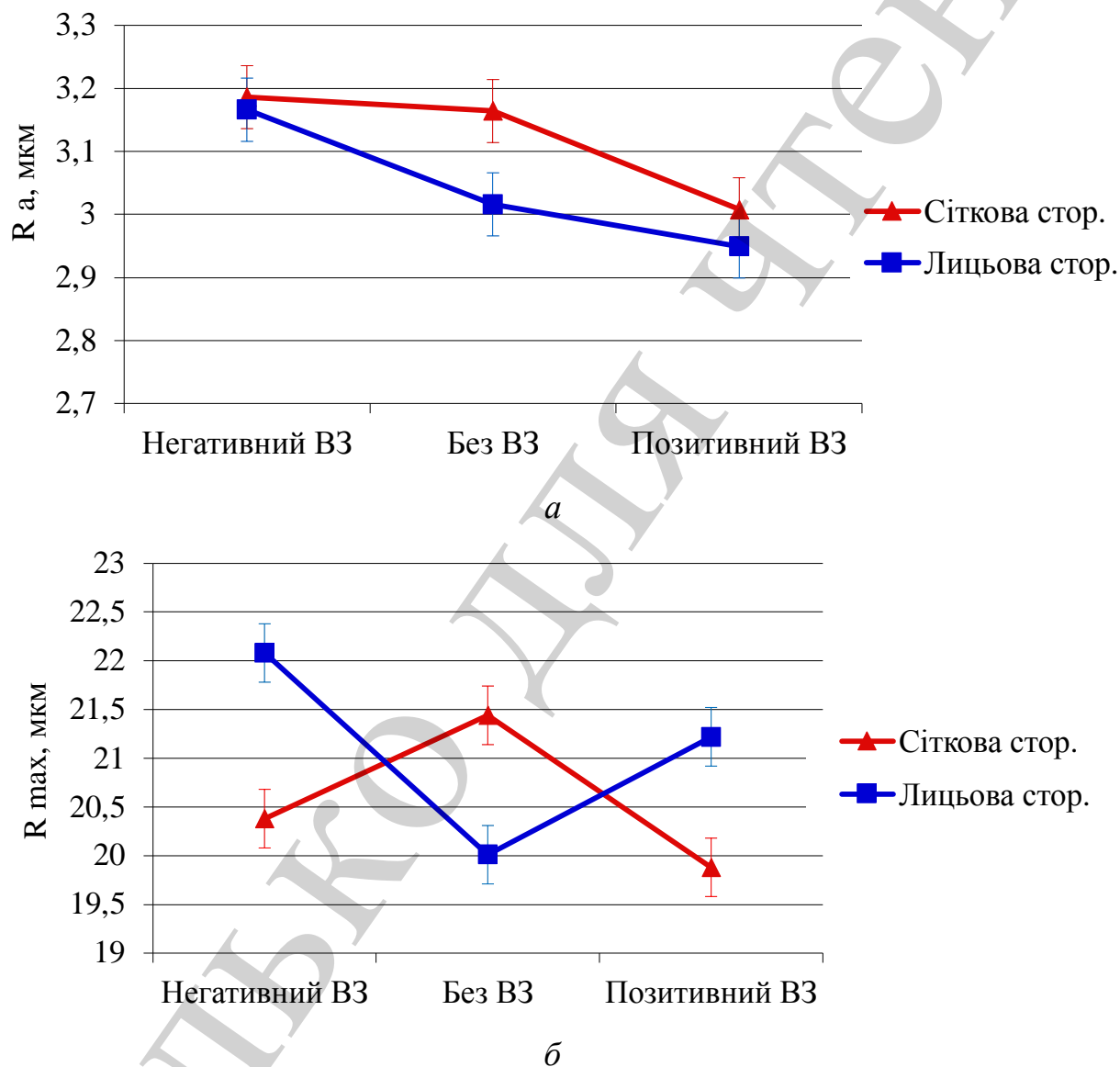


Рис. 4. Параметри шорсткості для різних ділянок паперу з лицьового та сіткового боків (метод контактної профілометрії): *а* – значення середнього арифметичного відхилення профілю (R_a); *б* – значення найбільшої висоти профілю (R_{\max})

За результатами АСМ-досліджень було визначено значення середньоарифметичної нерівності R_a , середньоквадратичної нерівності R_q , параметри асиметрії R_{sk} і міри ексцесу R_{ku} (табл. 3), отримано топографії поверхні зразка та профілі перерізів (табл. 4).

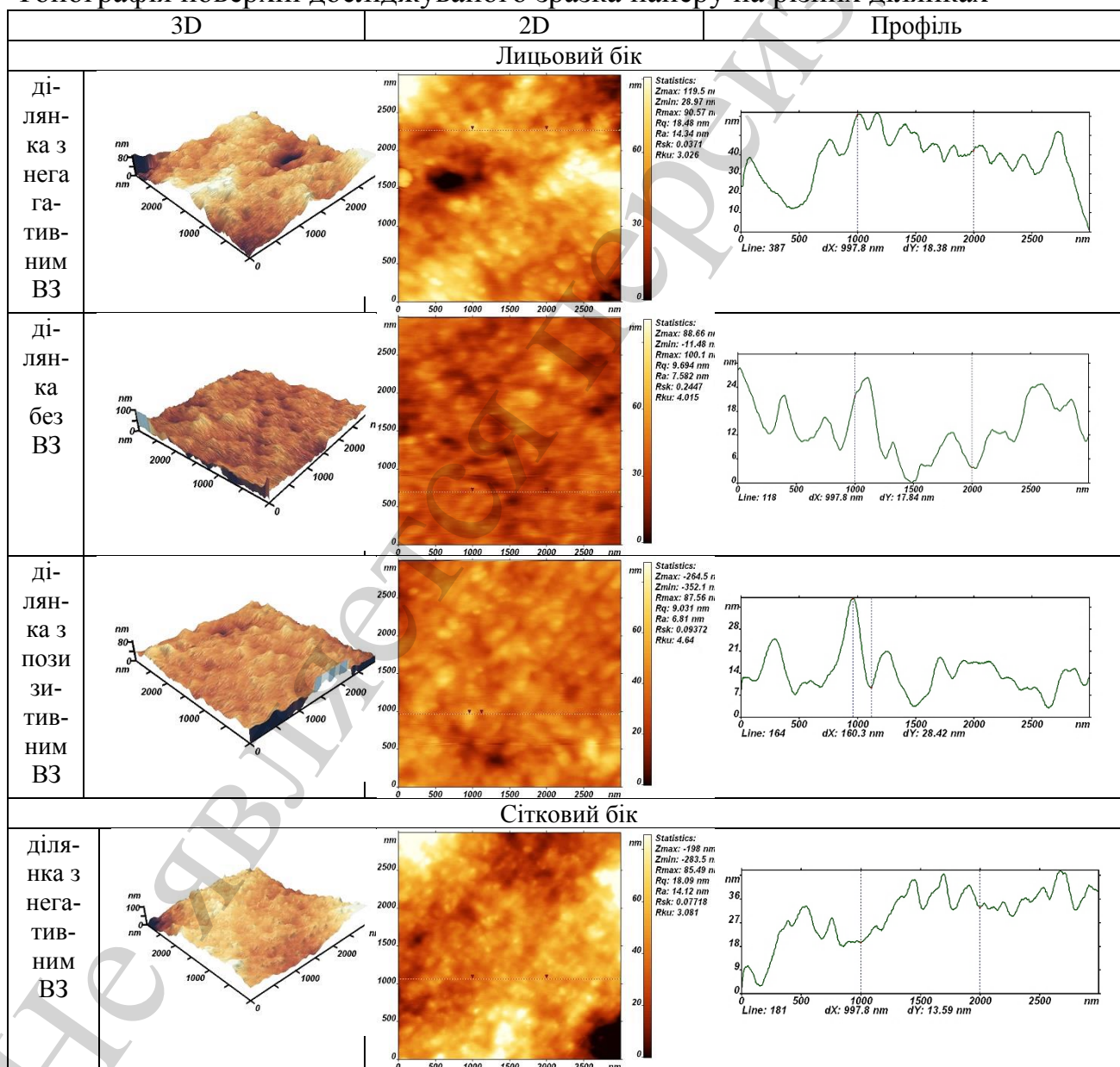
Таблиця 3

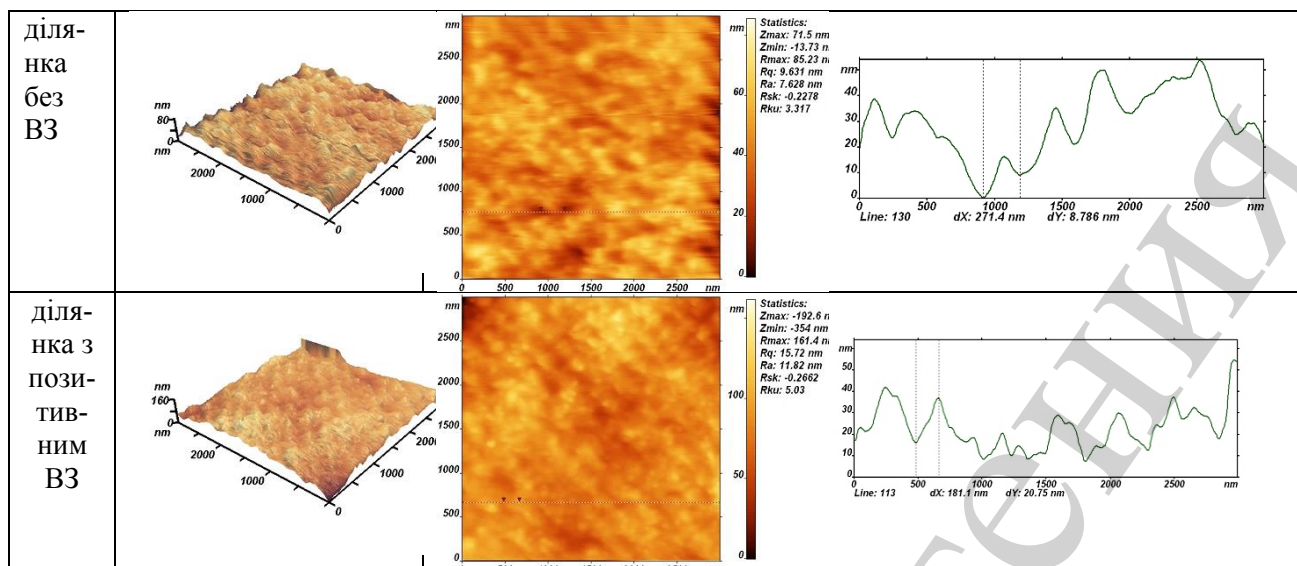
Параметри шорсткості поверхні зразків паперу, отримані методом АСМ, нм

| Параметри шорсткості | Сітковий бік | | | Лицьовий бік | | |
|----------------------|---------------|--------|---------------|---------------|---------|---------------|
| | Негативний ВЗ | Без ВЗ | Позитивний ВЗ | Негативний ВЗ | Без ВЗ | Позитивний ВЗ |
| R_{\max} | 108,501 | 85,231 | 161,403 | 90,572 | 100,104 | 87,561 |
| R_q | 18,261 | 9,630 | 15,721 | 18,484 | 9,692 | 9,034 |
| R_a | 14,383 | 7,633 | 11,824 | 14,340 | 7,583 | 6,810 |
| R_{sk} | -0,194 | -0,231 | -0,270 | 0,041 | 0,240 | 0,093 |
| R_{ku} | 3,462 | 3,320 | 5,031 | 3,034 | 4,021 | 4,644 |

Таблиця 4

Топографія поверхні досліджуваного зразка паперу на різних ділянках





За результатами АСМ-досліджень (табл. 3) були побудовані діаграми, що унаочнюють взаємозв'язок параметрів шорсткості R_a та R_{max} з досліджуваними ділянками паперу з лицьового та сіткового боку з позитивним ВЗ, негативним ВЗ та поза його межами (рис. 5).

Площа сканування для всіх досліджуваних зразків варіювалася від 9×9 мкм² до 500×500 нм². Параметри шорсткості поверхні змінювалися при зміні розміру кадру сканування. Так наприклад, для ділянки без ВЗ шорсткість в залежності від площі аналізу приймає значення $R_a = 7,58$ нм для площі (3×3 мкм), та значення $R_a = 12,6$ нм для площі (9×9 мкм). Така залежність шорсткості від площі поверхні паперу, що аналізується, – прогнозована поведінка рельєфу, яка має різні масштабні елементи в своїй структурі. Поступово шорсткість поверхні зменшується по мірі зменшення досліджуваної площі, поки її значення не досягає постійної величини. В даному випадку постійне значення шорсткості поверхні фіксувалося для всіх зразків при площі сканування 3×3 мкм², подальше зменшення площі сканування не приводило до зміни параметрів шорсткості.

Після отримання результатів дослідження обома методами було проведено їх статистичну обробку. Визначено абсолютну похибку та відносну похибку за методикою [22, 23]: для контактної профілометрії отримані значення, представлені у табл. 2, для АСМ методу обробка результатів проводилась за допомогою програмного забезпечення FemtoScan-онлайн [24].

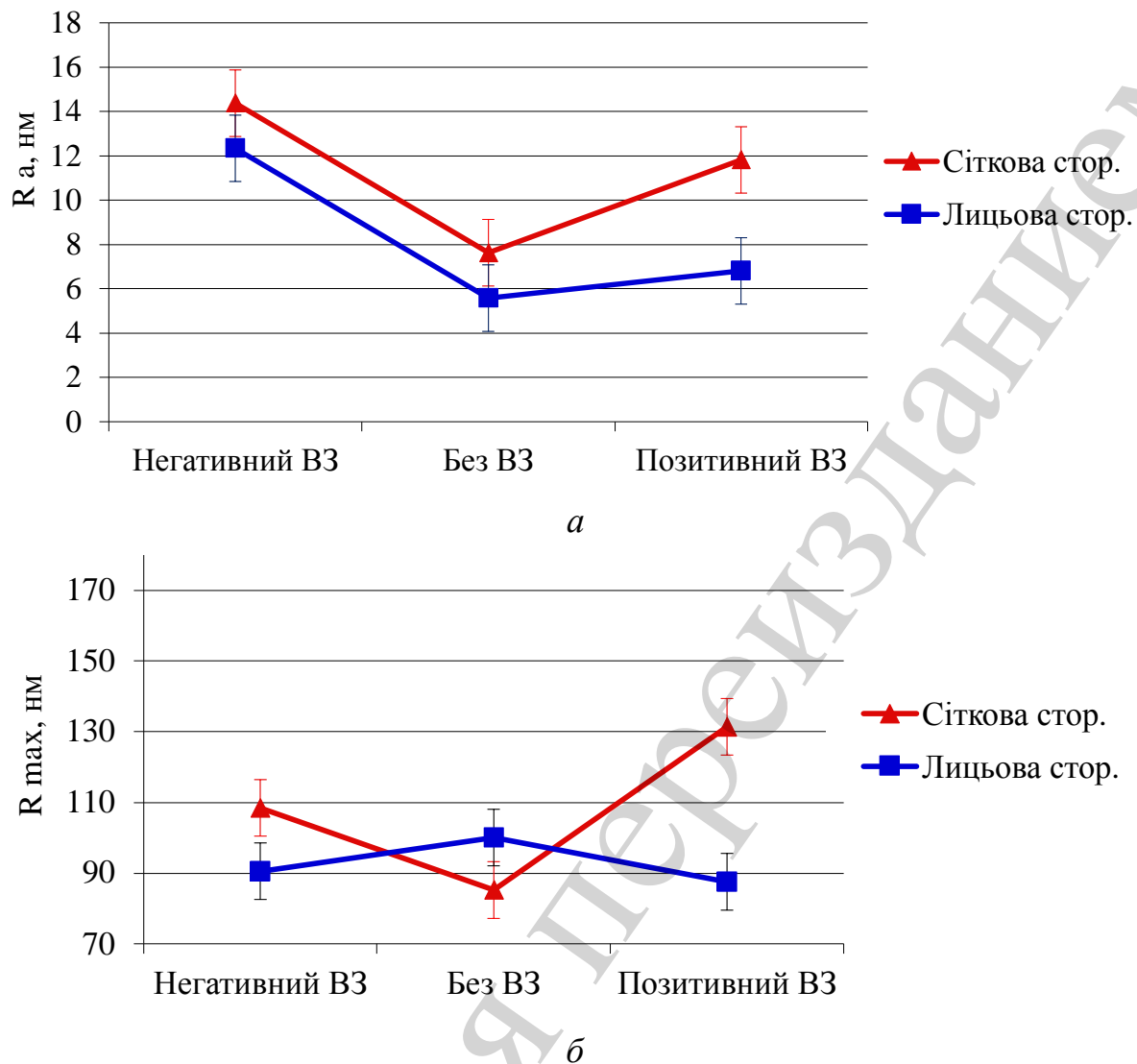


Рис. 5. Параметри шорсткості для різних ділянок паперу з лицьового та сітково-го боків (метод АСМ): *a* – значення середнього арифметичного відхилення профілю (R_a); *б* – значення найбільшої висоти профілю (R_{max})

Аналізуючи значення R_a , бачимо, що для ділянок із негативними ВЗ воно є більшим (сітковий бік – 14,383 нм, лицьовий бік – 14,340 нм), ніж для позитивних ВЗ (сітковий бік – 11,824 нм, лицьовий бік – 6,810 нм). Залежність значень R_{max} від ділянки вимірювання не встановлена. Це може бути пов'язано з тим, що розмір розглянутої ділянки (3000×3000 нм) охоплює лише частину волокна целюлози.

6. Обговорення результатів дослідження структури поверхні паперу з водними знаками

Після проведеного аналізу структури захищеного паперу можна стверджувати, що обидва методи дослідження є доцільними для вивчення структурних параметрів поверхні паперу. Дані, отримані різними методами, поєднано позиціонуванням та здійсненням вимірювання у визначеній ділянці. Результати вимі-

рювання контактним профілометром дали змогу прослідкувати кореляцію між значеннями середнього арифметичного відхилення профілю та наявністю негативних та позитивних водяних знаків (табл. 2 та рис. 2, 3). Це має місце як у дослідженнях контактним профілометром, так і АСМ. Значення найбільшої висоти профілю R_{\max} не залежить від ділянки вимірювання, що може бути пов'язано із хаотичним розміщенням волокон та частинок наповнювача у паперовій масі, що виступають над лінією профілю. Отримані закономірності уточнюють на нанорівні дані, представлені у роботах [12–14, 16, 17], спрямовані на точне відображення структурних параметрів паперу в нанометровому діапазоні методом АСМ, візуалізацію його структури [5], вивчення показників шорсткості [13, 14].

Аналізуючи значення середнього арифметичного відхилення профілю, отриманого методом АСМ (табл. 3, 4) виявлено, що для ділянок із негативними водяними знаками воно є більшим, ніж для позитивних. Залежність найбільшої висоти профілю від ділянки вимірювання не встановлена. Це може бути пов'язано з тим, що розмір розглянутої ділянки (3000 x 3000 нм) охоплює лише частину волокна целюлози.

На основі отриманих результатів запропоновано модель профілю поверхні паперу, яка є суперпозицією профілю, отриманого контактним профілометром, та профілю, отриманого АСМ (рис. 6).

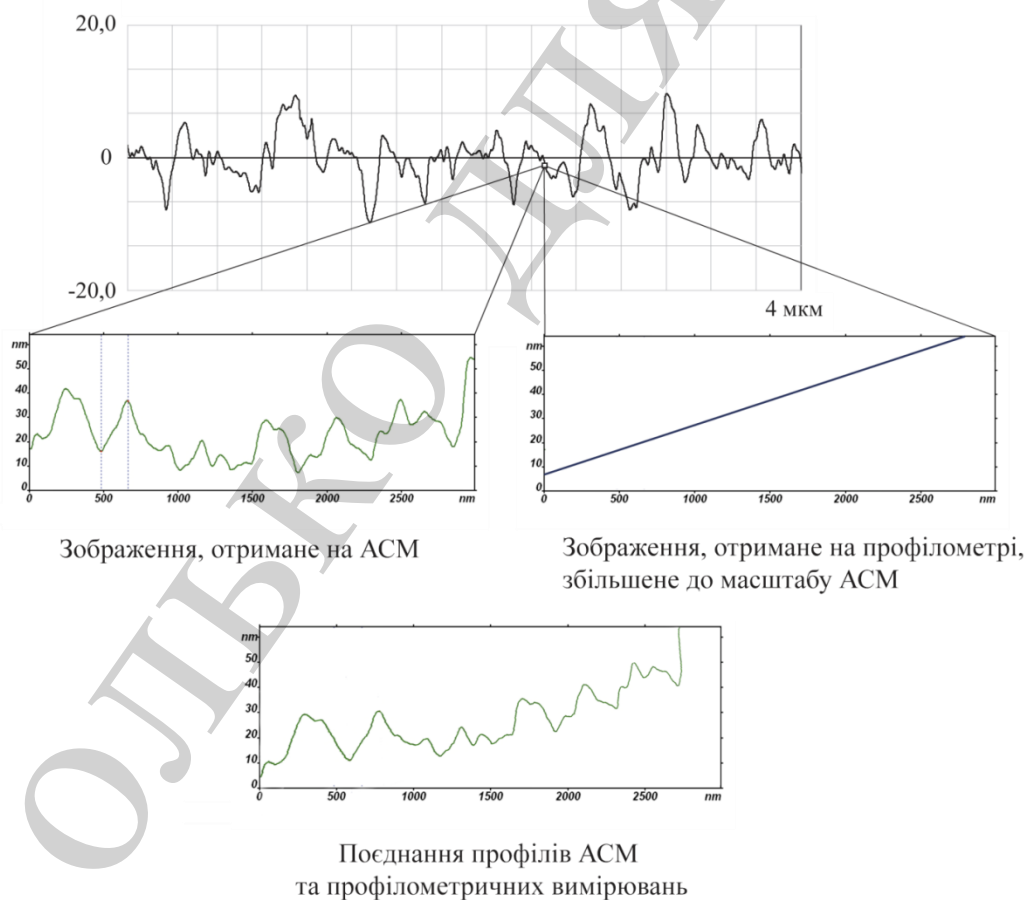


Рис. 6. Топографія поверхні зразка на рівні мікро- та нанометрів (сітковий бік, ділянка позитивного водяного знаку)

Поєднання цих методів дозволить аналізувати поверхню паперу на рівні мікро- та нанометрів. Метод профілометрії дає уявлення про профіль поверхні сформованого певним чином паперу, а АСМ – про морфологію його компонентів (волокна, наповнювачі, тощо).

Наразі використовуючи результати вимірювань, можна робити висновок щодо якості поверхні паперового полотна та його придатність для задруковування тим чи іншим способом друку, враховуючи наявність захисних елементів – ВЗ. Також отримані дані можна використовувати для входного контролю матеріалів на поліграфічних підприємствах та для контролю якості продукції целюлозно-паперової промисловості.

Наведені результати уточнюють та доповнюють попередні дослідження [9, 12, 13] застосуванням різних масштабів оцінювання. У подальших роботах варто дослідити за допомогою розробленої методики якість офсетного друку, зокрема, відтворення тонких гільйошних ліній, на папері із різними структурними характеристиками, що дало б можливість проведення кореляції якості відтворення та параметрами структури поверхні паперу.

Оскільки використані в дослідженні методи не дозволяють отримати проміжні дані між нано- та мікрометрами, в подальших дослідженнях задля чіткої візуалізації його структури планується задіяти проміжні діапазони вимірювання, зокрема оптичну профілометрію. Також отримані в цьому дослідженні експериментальні дані щодо топографії поверхні незадрукованого захищеного паперу, можуть бути доповнені в подальшому даними задрукованих офсетним друком зразків, що доцільно використати для визначення фрактальних параметрів паперу з ВЗ.

7. Висновки

1. Структурні параметри поверхні захищеного паперу є неоднаковими для ділянок із водяними знаками та без них. Аналізуючи параметри шорсткості, отримані методом контактної профілометрії та АСМ, можна побачити чітку кореляцію результатів. На ділянках із негативним ВЗ параметри шорсткості є найбільшими (сітковий бік – 3,186 мкм, 14,383 нм; лицьовий бік – 3,166 мкм, 14,340 нм), а на ділянках із позитивним ВЗ найменшими (сітковий бік – 3,008 мкм; 11,824 нм, лицьовий бік – 2,949 мкм, 6,810 нм), що пояснюється більшим ущільненням волокон у цих зонах та більшим тиском каландрів.

2. Методи контактної профілометрії та атомно-силової мікроскопії придатні для оцінки специфічних характеристик поверхні паперу, що визначає характер взаємодії різних ділянок захищеного паперу із друкарськими фарбами. Метод профілометрії дає уявлення про профіль поверхні сформованого певним чином паперу, а метод атомно-силової мікроскопії – про морфологію його компонентів (волокна, наповнювачі, тощо). Інформація про структурні властивості паперу дає змогу прогнозувати якість відбитків, а отже є актуальною, оскільки попереджає відбракування поліграфічної продукції спеціального призначення.

Література

1. TAPPI Standards–2012. TAPPI T 421. Qualitative (including optical microscopic) analysis of mineral filler and mineral coating of paper.
2. ISO 8791-4:2007. Paper and board. Determination of roughness/smoothness (air leak methods). Part 4: Print-surf method.
3. Handbook of physical testing of paper. Vol. 2 / C. Habeger, M. B. Lyne, R. Mark, J. Borch (Eds.). CRC Press, 2001. 560 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9780203910498>
4. Security features integrated in banknote paper // *Billetaria. International Review on Cash Management*. 2011. Issue 9. P. 38–39.
5. Perron M. Patenting of new banknote security features // *Billetaria. International Review on Cash Management*. 2010. Issue 9. P. 22–23.
6. Киричок П. О., Коростіль Ю. М., Шевчук А. В. Захист цінних паперів та документів суворого обліку. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 368 с.
7. Banknote Paper Deterioration Factors: Circulation Simulator Method / Kyrychok T., Shevchuk A., Nesterenko V., Kyrychok P. // *BioResources*. 2014. Vol. 9, Issue 1. P. 710–724. doi: <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.710-724>
8. Kyrychok T. Y., Kirilenko V. M., Sukhina E. G. Effect of wear on the electrophysical parameters of the banknotes // *Proceedings of the universities. Problems of printing and publishing*. 2013. Issue 6. P. 3–12.
9. Kyrychok T. Durability Banknote production: monograph. Kyiv: NTU «KPI», 2014. 308 p.
10. Badanie elektrofizycznych właściwości papieru banknotowego i banknotów / Kyrychok T., Havenko S., Kyrychok P., Sukhina Y., Kazhmuratov Z. // *Przegląd papierniczy*. 2016. Vol. 1, Issue 1. P. 52–56. doi: <https://doi.org/10.15199/54.2016.1.2>
11. Ionov V. The method of expert evaluation in banknote quality assessment // *Proceedings of 2nd Stochastic modeling techniques and data analysis Int. Conf. Chania*, 2012. P. 315–324.
12. Моделювання проникнення фарби в папір з водяними знаками під час офсетного друку / Киричок Т. Ю., Талімонова Н. Л., Заріцька В. І., Денисюк А. І. // *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2012. № 5. С. 135–139.
13. Kyrychok T., Klymenko T., Malkush N. Badanie szorstkosci powierzchni papierow ze znakami wodnymi. The Investigation of Roughness for Paper with Watermarks // *Przegland papierniczy*. 2012. P. 414–417.
14. Медяк Д. М., Маслакова И. А., Кулак И. И. Фрактальная геометрия структуры поверхности бумаги с водяными знаками // *Труды БГТУ*. 2011. № 9. С. 51–56.
15. From paper to nanopaper: evolution of mechanical and physical properties / González I., Alcalà M., Chinga-Carrasco G., Vilaseca F., Boufi S., Mutjé P. // *Cellulose*. 2014. Vol. 21, Issue 4. P. 2599–2609. doi: <https://doi.org/10.1007/s10570-014-0341-0>

16. Жуков М. Контроль структуры различных видов бумаги методом атомно-силовой микроскопии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 44–49.
17. Прямой метод контроля качества поверхности мелованных видов бумаги / Кирсанкин А. А., Михалева М. Г., Никольский С. Н., Мусохранова А. В., Стовбун С. В. // Химия растительного сырья. 2016. № 4. С. 159–163. doi: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2016041415>
18. Chinga-Carrasco G. Complementary microscopy techniques for surface characterisation of uncoated and mineral pigment coated paper // Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology. 2012. P. 1448–1455.
19. Influence of the surface roughness of coated and uncoated papers on the digital print mottle / Jurič I., Randelović D., Karlović I., Tomić I. // Journal of Graphic Engineering and Design. 2014. Vol. 5, Issue 1. P. 17–23.
20. Ying L., Beihai H. Characterization of ink pigment penetration and distribution related to surface topography of paper using confocal laser scanning microscopy // BioResources. 2011. Vol. 6, Issue 3. P. 2690–2702.
21. Майданюк С. В., Плівак О. А., Бекмурадов Р. А. Модуль для вимірювання фасонних профілів // Вісник ЖДТУ. 2007. № 2 (41). С. 15–18.
22. Ляшенко М. Я., Головань М. С. Чисельні методи. Київ, 1996. 285 с.
23. Алгоритмы: построение и анализ / Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн Р.; ред. И. В. Красиков. 2-е изд. М.: «Вильямс», 2005. 1296 с.
24. Филонов А. С., Яминский И. В. Полный программный пакет управления и обработки данных для сканирующей зондовой микроскопии ФемтоСкан Онлайн. М.: Центр перспективных технологий, 2008.